DOI: 10.22067/jacsm.2022.73148.1070
سال سی و سه، شمارهٔ یک، ۱٤۰۰(۷۰-۵۳)

شبیه‌سازی عددی فرآیند سوراخ‌کاری استخوان جمجمه توسط جت آب*

مقاله پژوهشی

شاهدالسادات علوی[۱] مسعود ضیائی راد[۲] نیما جمشیدی[۳]

چکیده *در این مقاله، مسئلهٔ سوراخ‌کاری سطح استخوان جمجمهٔ انسان به‌شکل نیم‌کره بااستفاده از جت آب به‌صورت عددی شبیه‌سازی سه‌بعدی شده‌است. شبیه‌سازی شامل هر دو بخش جریان و انتقال حرارت جت آب برخوردی و فرایند تراشه‌برداری سطح می‌شود. برای مدل‌سازی جریان دو فازی جت، از روش حجم سیال و برای سوراخ‌کاری سطح استخوان، از معادلات جانسون- کوک در روش اجزای محدود استفاده شده‌است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که ضرایب فشار و اصطکاک روی سطح برخورد، بستگی به فاصلهٔ نازل از سطح دارند و فشار با کمتر شدن فاصلهٔ نازل از سطح در نقطهٔ سکون افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش فاصلهٔ نازل از سطح، عدد ناسلت محلی در امتداد شعاع نیم‌کره و ماکزیمم ناسلت در نقطهٔ سکون هر دو کاهش می‌یابند. اثر قطر نازل بر ضرایب فشار و اصطکاک نیز بررسی شد و دیده شد که فشار با افزایش قطر نازل در نقطهٔ سکون افزایش خواهد یافت. تغییر سرعت جت نیز نشان داد که تغییر ۲۰ درصدی این سرعت، اثر قابل توجهی بر ضرایب فشار و اصطکاک ندارد، ولی عدد ناسلت را افزایش می‌دهد. در مدل‌سازی فرایند سوراخ‌کاری سطح استخوان، از خواص و ضرایب واقعی جنس استخوان ازجمله ضریب پوآسن و مدول یانگ استفاده شد. مقایسهٔ توزیع تنش ایجادشده در محل با دو معیار ترسکا و فون مایزز نشان می‌دهد که براساس پارامترهای پیشنهادی، سوراخ‌کاری به‌طرز مطلوبی انجام می‌پذیرد.*

واژه‌های کلیدی جت آب، سوراخ‌کاری جمجمه، شبیه‌سازی عددی، روش حجم محدود، روش اجزای محدود.

مقدمه

جت آب یا واترجت یک عنوان عمومی برای تجهیزاتی است که از یک جریان فشار بالای آب برای اهداف برش‌کاری و تمیزکاری بهره می‌گیرند. جت ساینده، هم‌چنین زیرشاخه‌ای از جت آب است که از مواد ساینده برای تسریع فرایند برش‌کاری استفاده می‌کند. در مقابل آن، جت آب خالص به جت آبی اطلاق می شود که در آن از مواد ساینده استفاده نشده‌است. تفاوت این دو در تماس بین جت آب و مواد ساینده است که سبب می شود عمق نفوذ سوراخ‌کاری جت آب خالص، کمتر از برش جت آب سایشی باشد. یکی از مهم‌ترین مزایای برش با جت آب این است که این فرایند ذاتاً دارای خاصیت برش‌کاری سرد است و ایجاد گرما نمی‌کند. با همین ویژگی، جت آب انواع مواد را به‌راحتی برش می‌دهد، درحالی‌که در سایر روش‌های برش کاری، احتمال سوختن، ذوب شدن یا ترک برداشتن ماده وجود دارد. علاوه‌بر این بعضی از فرایندهای گرمازا باعث تاب برداشتن و سخت شدن قطعه‌کار و یا انتشار گازهای خطرناک از آن می‌شوند. هنگام برش با جت آب، امکان تنظیم سرعت پیش‌روی برروی ماده وجود دارد. هنگام سوراخ‌کاری جت به لبهٔ ماده برخورد می‌کند و از طرف مقابل خارج می‌شود. درواقع، جت آب پس از رسیدن به پایین سوراخ، راه خود را از میان ماده ادامه نمی‌دهد، بلکه مسیرش را ۱۸۰ درجه تغییر می‌دهد.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/۷/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/۱۰/۱۹ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، دانشکدهٔ فنی مهندسی، گروه مهندسی مکانیک.
(۲) نویسندهٔ مسئول: دانشیار، دانشگاه اصفهان، دانشکدهٔ فنی مهندسی، گروه مهندسی مکانیک. **Email:** m.ziaeirad@eng.ui.ac.ir
(۳) استادیار، دانشگاه اصفهان، دانشکدهٔ فنی مهندسی، گروه مهندسی پزشکی.

در مطالعات پیشین درزمینهٔ سوراخ‌کاری استخوان می‌توان مقالات متعددی یافت که عمدتاً به بحث سوراخ‌کاری با مته پرداخته‌اند. از طرفی مقالاتی هم درمورد سوراخ‌کاری با جت آب وجود دارد که بیشتر مربوط به مطالعهٔ سوراخ‌کاری سطوح فلزی هستند. با این حال معدود کارهایی هم برروی سوراخ کاری استخوان با جت آب وجود دارد که اکثراً مطالعات تجربی می‌باشند.

تو و همکاران [1] از یک مدل المان‌محدود الاستوپلاستیک دینامیکی برای شبیه‌سازی فرایند سوراخ‌کاری استخوان با سرمته استفاده کردند. آنها درجه حرارت‌های مختلف سرمته را برای بررسی نقش آن در افزایش دما و توزیع تنش تماسی استخوان درحین سوراخ‌کاری مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که سرمته با دمای اولیهٔ پایین‌تر می‌تواند باعث افزایش درجه حرارت استخوان در طول سوراخ‌کاری شود. هم‌چنین رابطه‌ای بین دمای اولیهٔ سرمته و افزایش دما توسط آنها پیشنهاد شد.

شکوری و معرفت [2] بااستفاده از تئوری ماشین‌کاری، حرارت حاصل از فرآیند سوراخ‌کاری را محاسبه و به‌وسیلهٔ تئوری واینر، سهم حرارت ورودی به استخوان را تخمین زدند. آزمون‌های سوراخ‌کاری آنها برروی نمونه‌های استخوان گاو انجام پذیرفت؛ تغییرات دما در محل سوراخ اندازه‌گیری شد و با به‌کارگیری روش انتقال حرارت رسانشی معکوس، میزان حرارت ورودی محاسبه و با مقدار تئوری آن مقایسه شد. نتایج آنها نشان داد که مقادیر تئوری و تجربی در شرایط فرآیندی مختلف، به یکدیگر نزدیک هستند و ادعا کردند که تئوری‌های ماشین‌کاری و واینر، به‌خوبی قادر به پیش‌بینی میزان حرارت ورودی به استخوان و تغییرات دما در موضع سوراخ هستند.

شکوری و همکاران [3] تأثیر خنک‌کاری با گاز را بر کاهش دمای موضع سوراخ‌کاری استخوان به‌صورت تجربی بررسی کردند. آنها آزمون‌هایی بااستفاده از تزریق مستقیم گاز نیتروژن به‌وسیلهٔ مته با خنک‌کاری داخلی انجام دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که به‌کارگیری خنک‌کنندهٔ گازی، ازدیاد دمای سوراخ‌کاری را تا ۱۵ درجهٔ سانتی‌گراد کاهش می‌دهد و از وقوع نکروز حرارتی جلوگیری می‌کند. هم‌چنین حداکثر ازدیاد دمای سوراخ‌کاری معمولی را ٥٦ درجهٔ سانتی‌گراد گزارش کردند، درحالی‌که بااستفاده از خنک‌کنندهٔ گازی، میزان ازدیاد دما ٤٣ درجهٔ سانتی‌گراد به‌دست آمد. تحلیل آماری آنها نیز نشان داد که در سوراخ‌کاری با خنک‌کاری مستقیم گاز نیتروژن، تغییرات دما مستقل از سرعت چرخش مته است.

لیو و همکارانش [4] مدل عددی شکست سنگ توسط جت آب را براساس روش المان محدود (FEM) و هیدرودینامیک ذرات نرم (SPH) ارائه کردند. در مطالعهٔ آنها فشار ضربهٔ جت آب برای قطر و سرعت‌های مختلف جت بررسی شد. سپس اثر قطر جت آب، زاویهٔ جت و سرعت جت برروی کارایی شکست سنگ مورد مطالعه قرار گرفت و دلایل آن از طریق تجزیه‌وتحلیل ضربهٔ حرکت سنگ، انرژی سنگ، عمق برش و عرض برش متوسط نشان داده شد. نتایج آنها نشان داد که بازده شکست سنگ در ابتدا با زاویهٔ جت افزایش و سپس کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که زاویهٔ جت حدود ۱۰ درجه برای شکستن سنگ، بهینه‌ترین گزینه است.

در مقالهٔ لی و همکاران [5] یک ماژول تجزیه‌وتحلیل کوپلینگ جامد- سیال در نرم‌افزار انسیس مورداستفاده قرار گرفت تا اثرات تنش حرارتی برروی شکست سنگ بااستفاده از جت آب نشان داده شود و فاصلهٔ بهینه بین نازل و سنگ محاسبه شود. آنها مشاهده کردند که روند تغییرات درجه حرارت، با فاصلهٔ بهینه بین نازل و سنگ منطبق است. هم‌چنین کوپلینگ میدان‌های دما و فشار می‌تواند منطقهٔ شکستن سنگ توسط جت آب را افزایش دهد.

حقیقی و غلام‌پور [6] فرایند سوراخ‌کاری استخوان را که شامل سه ماده و سه قطر مته و سه عمق حفاری،

چهار حالت خنک‌کننده و ده زاویهٔ حفاری می‌شود، برروی استخوان‌های درشت‌نی و ران بااستفاده از روش اجزای محدود شبیه‌سازی کردند. پس از اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی بااستفاده از مقایسه با داده‌های تجربی، تأثیر متغیرهای فوق را بر تغییرات سه پارامتر حداکثر دما، نیروی رانش و گشتاور و هم‌چنین ماندگاری دما مورد ارزیابی قرار دادند. آنها دریافتند که افزایش قطر مته و عمق حفاری و کاهش زوایای حفاری منجر به افزایش پارامترهای نام‌برده می‌شود و شرایط حفاری استخوان نامطلوب‌تر می‌شود. مته با مواد فولادی ضد زنگ و با خنک‌کننده‌های گازی (به‌ویژه گاز CO_2) منجر به شرایط مطلوب‌تری برای حفاری استخوان، حتی در قطرهای مته و عمق حفاری‌های بالاتر می‌گردد. آنها هم‌چنین در این مقاله، روابطی بین دما، نیروی رانش و گشتاور با زوایای حفاری در مودهای خنک‌کاری مختلف برای برنامه‌ریزی ربات‌های حفاری در حین جراحی‌های ارتوپدی با هدف دست‌یابی به زاویهٔ دقیق بهینه در حین جراحی ارائه کردند.

دی‌ونوتا و همکاران [7] بااستفاده از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) انتقال جرم و جریان سیال مغشوش جت آزاد مستطیلی شکل هوا را شبیه سازی کردند. شبیه‌سازی عددی آنها برای اعداد رینولدز ۳۴۰۰ و ۶۸۰۰ به‌صورت سه‌بعدی و برای اعداد رینولدز ۱۰۴۰۰ و ۲۲۰۰۰ به‌صورت دوبعدی انجام شد. نتایج محاسبهٔ سرعت‌های متوسط و لحظه‌ای آشفتگی در خط مرکزی توسط آنها، تطابق خوبی با اندازه‌گیری‌های تجربی داشت.

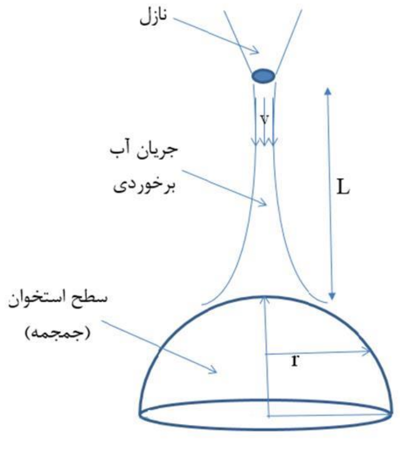
کوران و همکاران [8] انتقال گرما و هیدرودینامیک برخورد جت آب آزاد را روی سطح یک صفحهٔ تخت به‌صورت تجربی بررسی کردند. در مطالعهٔ آنها اثرات فاصلهٔ بین نازل تا صفحه -که برابر یا کمتر از قطر نازل با شد- بر عدد نا سلت، قطر پرش هیدرولیکی و فشار در نقطهٔ سکون بررسی شد. نتایج آنها نشان داد که عدد نا سلت سکون نرمالیزه، فشار و قطر پرش هیدرولیکی به دو منطقه شامل منطقهٔ انحراف جت و منطقهٔ اینرسی غالب تقسیم می‌شوند. در منطقهٔ اول، عدد ناسلت سکون و قطر پرش هیدرولیکی با کاهش فاصله بین نازل تا صفحه، افزایش می‌یابد، درحالی‌که فشار سکون به‌دلیل اثر انحراف جت زیاد می‌شود.

باگل و همکارانش [9] ویژگی‌های انتقال حرارت برخورد جت آب آزاد روی یک سطح منحنی به‌شکل نیما ستوانهٔ محدب را به صورت تجربی برر سی کردند. در آزمایش‌های آنها دو نسبت انحنای مختلف (D/d) در نظر گرفته شد که d قطر داخلی لولهٔ دایره‌ای نازل و D قطر خارجی سطح محدب نیم‌استوانه‌ای است. فا صلهٔ جت تا سطح روی $H/d = 4$ و $d = 6mm$ ثابت شد. اعداد رینولدز از ۱۷۰۳۶ تا ۴۲۵۹۰ برای این مطالعهٔ تجربی در نظر گرفته شد و خطوط اعداد ناسلت برای سه عدد رینولدز مختلف و دو نسبت انحنای مختلف ارائه شدند. مطالعهٔ آنها نشان داد که انحنای سطح بر نرخ دفع گرما از نزدیکی نقطهٔ سکون تأثیر گذار است. هم‌چنین دریافتند که انتقال حرارت در ناحیهٔ دور از محل برخورد در جهت پیرامونی، به‌ویژه در اعداد رینولدز بالا، تحت تأثیر انحنا قرار دارد.

بررسی مقالات مرورشده و سایر مقالات موجود درزمینهٔ سوراخ‌کاری نشان می‌دهد که کارهای گذشته بیشتر برروی سوراخ‌کاری استخوان با مته و یا سوراخ‌کاری فلزات با جت آب تمرکز داشته‌اند. ازاین‌رو خلأ انجام یک مطالعهٔ عددی جامع درزمینهٔ سوراخ‌کاری استخوان با جت آب، شامل شبیه‌سازی جریان جت برخوردی و حل عددی فرآیند سوراخ‌کاری، احساس می‌شود. در این مقاله، ضمن شبیه‌سازی عددی برخورد جت جریان مغشوش به سطح بااستفاده از روش حجم محدود، با به‌کارگیری روش المان محدود و معیارهای فون مایزز و ترسکا، فرآیند سوراخ‌کاری نیز مدل‌سازی شده‌است و اثر پارامترهای مختلفی هم‌چون فاصلهٔ نازل از سطح، قطر و سرعت نازل مورد بررسی قرار گرفته‌است.

مدل فیزیکی و فرضیات

نمایی از هندسهٔ مسئله و جریان جت برخوردی به سطح آن در شکل (۱) آورده شده‌است. هندسهٔ سه‌بعدی مورد نظر، نیم‌کره‌ای به قطر D است که به‌عنوان مدل ساده‌ای از جمجمهٔ سر انسان درنظر گرفته می‌شود. جت آب برای سوراخ‌کاری استخوان، با سرعت ثابت V از نازلی با سطح مقطع گرد به قطر d که در فاصلهٔ L از بالاترین نقطهٔ نیم‌کره قرار گرفته‌است، در امتداد شعاع نیم‌کره به آن برخورد می‌کند و ضمن حفظ تماس با سطح، به حرکت خود به پیرامون محل برخورد ادامه می دهد. دمای سطح کره ثابت فرض می‌شود. هم‌چنین جریان جت دائم و تراکم‌ناپذیر درنظر گرفته می‌شود. براساس سرعت جت آزاد مورد مطالعه و قطر خروجی نازل، عدد رینولدز در محدودهٔ جریان مغشوش سیال قرار خواهد گرفت. هوای محیط اطراف جت نیز ساکن است و در شرایط استاندارد قرار دارد. اثرات گرانش باتوجه به سرعت بالای جت و غالب بودن جریان جابه‌جایی اجباری در جریان جت، قابل صرف‌نظر کردن است.



شکل ۱ نمایی از برخورد یک جت آب به سطح نیم‌کره‌ای‌شکل جمجمه

علاوه‌بر آن، عملیات سوراخ‌کاری سطح نیز پایا فرض می‌شود؛ به این معنی که از فرایند تراشه‌برداری صرف‌نظر می‌شود و تنها اثر نیروی وارد بر سطح از طرف جت آب در شکستن المان‌های سطح جامد درنظر گرفته خواهد شد.

مدل‌سازی ریاضی

معادلات حاکم بر جریان جت سیال. در روش حجم سیال برای جریان‌های دوفازی تراکم‌ناپذیر، یک معادلهٔ انتقال که دربردارندهٔ نسبت حجمی فازها است به‌طور هم‌زمان به‌همراه معادلات پیوستگی و مومنتوم حل می‌شود [10]؛ لذا سه معادلهٔ حاکم بر جریان جت عبارتند از:

$$\nabla \cdot \mathrm{v} = 0 \tag{۱}$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathrm{v}\gamma) = 0 \tag{۲}$$

$$\frac{\partial (\rho \mathrm{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathrm{v}\mathrm{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \tag{۳}$$

که v بردار سرعت سه‌بعدی و τ در معادلهٔ مومنتم، تانسور تنش لزج است و در حالت کلی (جریان مغشوش سه‌بعدی) به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\tau = \mu[\nabla \mathrm{v} + (\nabla \mathrm{v})^{T}] \tag{٤}$$

که این تانسور در جریان مغشوش، دربردارندهٔ هم‌بستگی‌های بین نوسانات سرعت نیز هست. هم‌چنین، μ لزجت کل و ∇v گرادیان بردار سرعت سه‌بعدی است. در معادلهٔ (۲) γ کسر حجمی است که برابر است با:

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{فاز بخار} \\ 0 < \gamma < 1 & \text{در سطح مشترک} \\ 1 & \text{فاز مایع} \end{cases} \tag{۵}$$

در اینجا یک مخلوط دوفازی همگن داریم که خواص آن به‌صورت میانگین وزنی از نسبت حجمی به‌دست می‌آیند. این بدان معنی است که در نواحی تک‌فازی، این خواص مشابه خواص همان فاز و در نواحی سطح مشترک دو فاز، به‌صورت میانگین وزنی از نسبت حجمی نوشته می‌شوند [10].

$$\rho = \gamma\rho_l + (1-\gamma)\rho_v \tag{۶}$$

$$\mu = \gamma\mu_l + (1-\gamma)\mu_v \tag{۷}$$

در این روابط، زیرنویس‌های l و v به‌ترتیب بیان‌کنندهٔ فاز مایع و بخار هستند.

هم‌بستگی بین نوسانات سرعت در تانسور تنش بایستی توسط یک مدل اغتشاشی مناسب محاسبه شوند. برای مسئلهٔ حاضر از مدل آشفتگی انتقال تنش رینولدز (RSM) که برای جریان‌های جت برخوردی مناسب است، استفاده می‌شود. این مدل پیچیده‌ترین نوع مدل‌سازی تلاطم مبتنی بر روش متوسط‌گیری رینولدز (RANS) است که در نرم‌افزار انسیس ارائه شده‌است. در این روش مؤلفه‌های هم‌بسته با حل معادلات انتقال برای هریک از آنها محاسبه می‌شوند. به این ترتیب، هفت معادلهٔ انتقال اضافی علاوه‌بر معادلات حاکم (۱- ۳) در جریان سه‌بعدی مورد نیاز است [11].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\overline{u_i'u_j'}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k\overline{u_i'u_j'}) = -\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\rho\overline{u_i'u_j'u_k'} + \overline{p'(\delta_{kj}u_i' + \delta_{ik}u_j')}\right) + \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\mu\frac{\partial}{\partial x_k}\overline{u_i'u_j'}\right) - \rho\left(\overline{u_i'u_k'}\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j'u_k'}\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right) + p'\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i}\right) - 2\mu\overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_k}\frac{\partial u_j'}{\partial x_k}} - 2\rho\Omega_k(\overline{u_j'u_m'}\varepsilon_{ikm} + \overline{u_i'u_m'}\varepsilon_{jkm}) \tag{۸}$$

که در آن از جملات بویانسی صرف‌نظر شده‌است. در معادلهٔ فوق u' و p' به‌ترتیب معرف نوسانات سرعت و فشار و ε ترم اتلاف لزج است که بااستفاده از یک معادلهٔ انتقال اضافی محاسبه خواهد شد. با تغییر اندیس‌های i و j و k در این معادله، از ۱ تا ۳، معادلات انتقال لازم برای محاسبهٔ هم‌بستگی‌های نوسانات سرعت به‌دست می‌آیند.

از آنجا که مدل RSM اثرات انحنای خطوط جریان، چرخش و تغییرات سریع در میزان کرنش را به شکلی دقیق‌تر از مدل‌های یک معادله و دو معادله‌ای حساب می‌کند، پتانسیل بیشتری برای ارائهٔ پیش‌بینی‌های دقیق برای جریان‌های پیچیده دارد. از جمله کاربردهای RSM می‌توان به جریان سیکلون، جریان‌های شدیداً چرخشی در احتراق، مسیرهای چرخشی جریان، جت‌های برخوردی و جریان‌های ثانویه در کانال‌ها اشاره کرد.

لازم به ذکر است که در نواحی نزدیک به دیواره، مدل آشفتگی برای تخمین دقیق‌تر نوسانات سرعت، به یک تابع دیوارهٔ تحلیلی مجهز می‌شود که در این مطالعه از تابع دیوارهٔ استاندارد برای ناحیهٔ لایهٔ مرزی مجاور سطح استفاده شده‌است.

معادلات حاکم بر روش جانسون- کوک. معادلات بنیادی دارای ثابت‌هایی هستند که منظور از تعیین رفتار دینامیکی مواد، یافتن مقادیر این ثابت‌ها و تعیین ضرایب معادلات برای مادهٔ موردنظر در شرایط فرآیندی خاص است. برای تعیین این ضرایب، می‌توان از دستگاه تست دو میله‌ای فشاری هاپکینسون و یا از تست‌های ماشین‌کاری متعامد استفاده کرد. برای تحلیل فرآیند حاضر، از رابطهٔ جانسون- کوک استفاده شده‌است که در آن، ارتباط بین تنش، کرنش و میدان‌های دما توسط رابطهٔ زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \times \left[1 + C\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right] \times \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)m\right] \tag{۹}$$

$$D = \Sigma\left(\frac{\Delta\,\bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_f^{pl}}\right) \tag{۱۰}$$

که در آن:

$$\bar{\varepsilon}_f^{pl} = [d_1 + d_2 \exp(d_3 \frac{p}{q})] \times [1 + d_4 \ln(\frac{\varepsilon^{pl}}{\varepsilon_0})] \times [1 + d_5 \frac{T-T_0}{T_m - T_0}] \quad (11)$$

معادلهٔ (۹) تنش واقعی را محاسبه می‌کند که برای شبیه‌سازی المان محدود در نرخ کرنش‌های بسیار بالا مناسب است. در این رابطه، عبارت اول بیانگر نرخ کرنش سختی، عبارت دوم بیانگر جریان تنش در نرخ کرنش‌های بالا و عبارت سوم معرف نرخ نرم‌شدگی مواد در اثر براده‌برداری است. پارامترهای A, B, C, n, m همان ثابت‌های مواد هستند که از جداول مهندسی قابل استخراج هستند. T_0، T_m و T به‌ترتیب دمای ذوب ماده، دمای محیط و دمای ماده هستند [12, 13]. در مدل جانسون- کوک، جدا شدن براده از قطعه‌کار نیز محاسبه می‌شود و این شکست دینامیکی زمانی حادث می‌شود که معیار شکست (D) از مقدار یک تجاوز کند. این پارامتر در معادلهٔ (۱۰) تعریف شده‌است. در این رابطه $\Delta\bar{\varepsilon}^{pl}$ بیانگر افزایش کششی پلاستیک و $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$ معرف کششی است که منجر به جدا شدن براده از قطعه‌کار می‌گردد و با رابطهٔ (۱۱) بیان می‌شود. در این رابطه پارامترهای شکست به‌صورت تجربی در آزمایشگاه مورد تست واقع می‌شوند. هم‌چنین p در این رابطه، تنش فشاری و q تنش فون‌مایزز است [14].

روش شبیه‌سازی عددی

در این تحقیق، شبیه‌سازی عددی جریان جت بااستفاده از نرم‌افزار انسیس (Ansys) و مدل‌سازی فرایند سوراخ‌کاری سطح بااستفاده از نرم‌افزار آباکوس (Abaqus) انجام گرفته‌است. معادلات حاکم و شرایط مرزی مربوط به جریان سیال براساس روش حجم محدود و استفاده از الگوریتم SIMPLE برای میدان کوپل سرعت- فشار حل شده‌اند. برای گسسته‌سازی معادلهٔ فشار از روش میان‌یابی PRESTO استفاده شده‌است. روش مذکور برای جریان در میدان‌های دارای انحنای سطح زیاد توصیه شده‌است. هم‌چنین جملات جابه‌جایی معادلات انتقال ممنتوم و انرژی بااستفاده از روش QUICK که دقت مناسبی برای جریان‌های پیچیده در شبکه‌های بدون ساختار دارد، گسسته‌سازی می‌شود. مدل آشفتگی مناسب برای این مسئله نیز همان‌طور که در بخش معادلات حاکم ذکر شد، مدل انتقال تنش رینولدز (RSM) است. این روش برمبنای مطالعات گذشته می‌تواند تخمین دقیق‌تری از مؤلفه‌های نوسانی جریان آشفته در جریان‌های غیرایزوتروپیک و حوزه‌های محاسباتی دارای انحنای سطح شدید ارائه دهد.

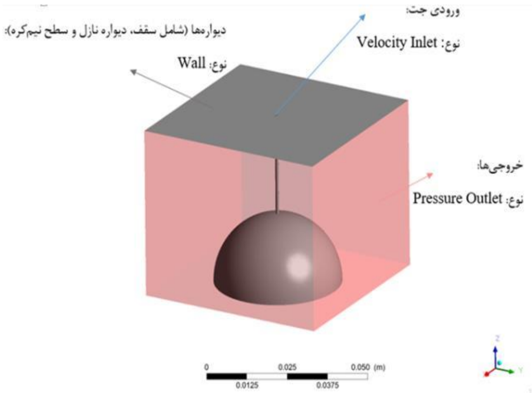
میدان محاسباتی و شبکه‌بندی حوزهٔ حل. برای مسئلهٔ حاضر، از شبکهٔ بی‌سازمان برای گسسته‌سازی دامنهٔ محاسباتی استفاده شده‌است. شکل (۲) حوزهٔ محاسباتی جریان سیال را روی سطح نیم‌کره به‌همراه شرایط مرزی اعمال‌شده نشان می‌دهد و در شکل (۳) شبکه‌بندی بدون ساختار به‌کار رفته برای این میدان حل قابل مشاهده است.

برای دست‌یابی به دقت مناسب در حل عددی، بررسی استقلال از شبکهٔ محاسباتی ضروری است؛ به این معنا که تغییر در ابعاد شبکه تأثیری بر نتایج حل عددی ندارد.

به‌منظور بررسی استقلال نتایج از شبکهٔ محاسباتی، از چهار شبکه با تعداد سلول ۴۷۸،۵۰۰، ۸۱۳،۶۰۰، ۵۷۴،۲۰۰ و ۱،۳۰۱،۷۶۰ استفاده شد. مقایسهٔ این چهار شبکه برای عدد ناسلت متوسط جت برخوردی، با فاصلهٔ نازل از سطح برابر با ۰/۵ میلی‌متر و قطر نازل ۱ میلی‌متر در سرعت جریان ۲۳۲ متر بر ثانیه انجام شده‌است.

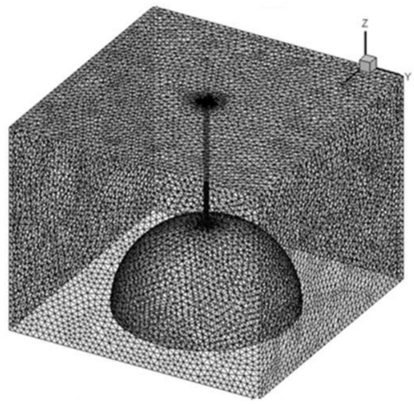
مشاهده شد که عدد ناسلت متوسط سطح نیم‌کره در شبکه‌های با ۸۱۳،۶۰۰ و ۱،۳۰۱،۷۶۰ سلول محاسباتی، به هم نزدیک‌تر هستند و اختلافی به‌میزان ۴/۸ درصدی نسبت‌به هم، در مقایسه با اختلاف ۱۰/۷ درصدی شبکه‌های اول و دوم و اختلاف ۹/۷ درصدی شبکه‌های دوم و سوم نسبت‌به هم دارند. بنابراین با ریزتر شدن شبکه و افزایش تعداد سلول محاسباتی از

۸۱۳٫۶۰۰ به ۱٫۳۰۱٫۷۶۰ نتایج تغییر چندانی نمی‌کند. درنتیجه انتخاب شبکه‌ای با تعداد ۸۱۳٫۶۰۰ سلول محاسباتی، از نظر زمان و حجم محاسبات مقرون به صرفه‌تر است.

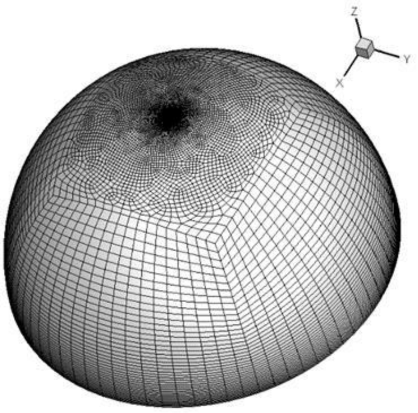


شکل ۲ دامنه محاسباتی و شرایط مرزی به‌کاررفته در شبیه‌سازی جریان جت برخوردی به سطح

هم‌چنین باتوجه به استفاده از تابع دیوارهٔ استاندارد برای حل لایهٔ مرزی مجاور دیواره، لازم است تا شبکه‌بندی در نزدیک دیوار به‌گونه‌ای تنظیم شود که y^+ (عدد رینولدز محلی برمبنای فاصله از دیوار) در محدودهٔ مجاز (۳۰ تا ۳۰۰) قرار گیرد. در این مورد نیز با تغییر اندازهٔ شبکه در محدودهٔ لایهٔ مرزی و رسم y^+ شبکه‌ای برای انجام محاسبات انتخاب شد که این خصوصیت را داشته باشد.



الف

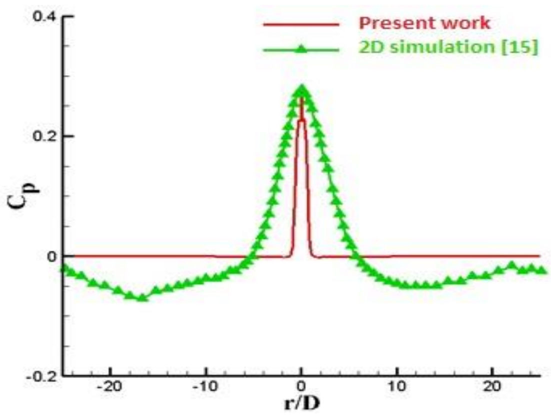


ب

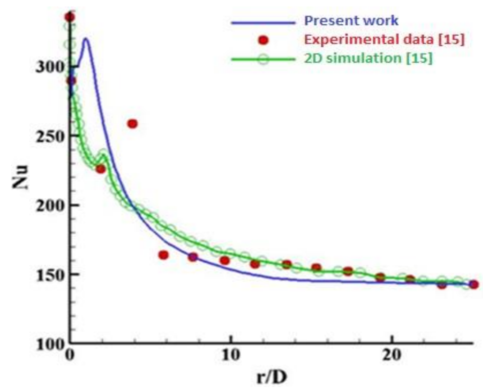
شکل ۳ (الف) شبکه‌بندی میدان محاسباتی برای جریان سیال جت برخوردی به سطح نیم‌کره، (ب) المان‌بندی سطح نیم‌کره برای فرایند سوراخ‌کاری روی سطح

اعتبارسنجی حل عددی. برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی جریان جت از نتایج عددی و آزمایشگاهی هو و ژانگ [15] بهره برده شد. بدین منظور توزیع ضریب فشار و عدد ناسلت روی سطح برخورد در امتداد شعاع نیم‌کره بین دو مطالعه مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج برای سرعت جت ۲۹۰ m/s (معادل عدد رینولدز ۱۹٫٤۷۸) و فاصلهٔ نازل تا سطح L/D=۲۵ به‌دست آمده‌اند. البته لازم به ذکر است که شبیه‌سازی عددی انجام‌شده توسط هو و ژانگ [15] به‌صورت دوبعدی (یعنی جریان جت عمودی برخوردی به سطح یک نیم‌دایره) صورت گرفته‌است، اما در کار حاضر شبیه‌سازی به‌صورت سه‌بعدی انجام‌شده‌است. همان‌طور که در شکل (٤) نشان داده شده‌است، توزیع فشار برروی سطح برخورد با شبیه‌سازی دوبعدی مرجع مذکور دارای اختلاف است؛ به این معنی که حل دوبعدی آنها پراکندگی بیشتری را در توزیع ضریب فشار پیرامون نقطهٔ سکون پیش‌بینی کرده و هم‌چنین در نواحی دور از نقطهٔ برخورد، ضرایب فشار کمتر از صفر به‌دست آمده‌است، درحالی‌که نتایج حل سه‌بعدی حاضر در این نواحی متفاوت است. با این حال هر دو مطالعه مقدار ماکزیمم یکسانی برای ضریب فشار در نقطهٔ برخورد به‌دست آورده‌اند. مقایسهٔ تغییرات عدد ناسلت در شکل

(۵) با شبیه‌سازی عددی و هم‌چنین اندازه‌گیری‌های تجربی همان مرجع نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی حاضر تطابق بهتری با داده‌های تجربی به‌خصوص در محدودهٔ مجاور نقطهٔ برخورد دارد.



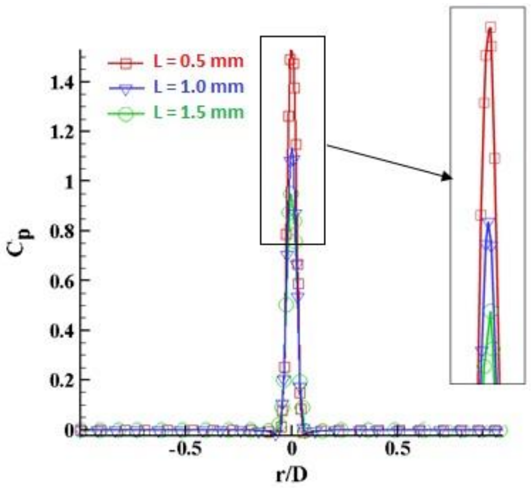
شکل ٤ تغییرات ضریب فشار در امتداد شعاع نیمکره، مقایسهٔ کار حاضر با حل عددی دوبعدی هو و ژانگ



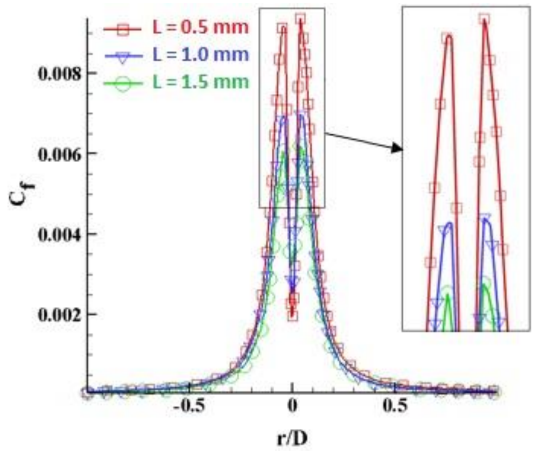
شکل ۵ تغییرات ضریب انتقال حرارت در امتداد شعاع نیم‌کره، مقایسهٔ مطالعهٔ حاضر با حل عددی دوبعدی و داده‌های تجربی هو و ژانگ

بررسی نتایج و بحث

اثر فا صلهٔ نازل از سطح برخورد. برای بررسی اثر فاصلهٔ نازل از سطح برخورد، سه فاصلهٔ ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته‌است. شکل (٦) توزیع ضریب فشار را در امتداد شعاع نیم‌کره به‌ازای این سه فا صلهٔ نازل نشان می‌دهد. مشاهده می شود که اگرچه تغییر فاصلهٔ نازل از سطح تأثیر چندانی بر ضریب فشار در نقاط دور از نقطهٔ سکون نمی گذارد، ولی به‌طور مشخص با کاهش فاصلهٔ نازل از سطح، فشار در نقطهٔ سکون افزایش می‌یابد، چرا که جریان ممنتوم بالاتری در برخورد با سطح در فوا صل کمتر وارد خواهد کرد. افزایش این فشار با کاهش فا صله هم‌چنین به صورت صعودی است، یعنی همان‌طور که در شکل دیده می شود، فاصلهٔ مقدار قلهٔ ضریب فشار در نقطهٔ سکون در فواصل نازل ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر بیشتر از فواصل ۱ تا ۱/۵ میلی‌متر است. ناحیهٔ نزدیک محل برخورد به‌عنوان ناحیهٔ انحراف شناخته می‌شود که در آن، سرعت محوری به‌سرعت کاهش و فشار استاتیک به‌شدت افزایش می‌یابد. در نقطهٔ سکون (r /D = 0)، سرعت به صفر می‌رسد و ضریب فشار به حداکثر مقدار خود می‌رسد و سپس با شتاب گرفتن جریان در امتداد سطح برخورد، به‌سرعت کاهش می‌یابد.



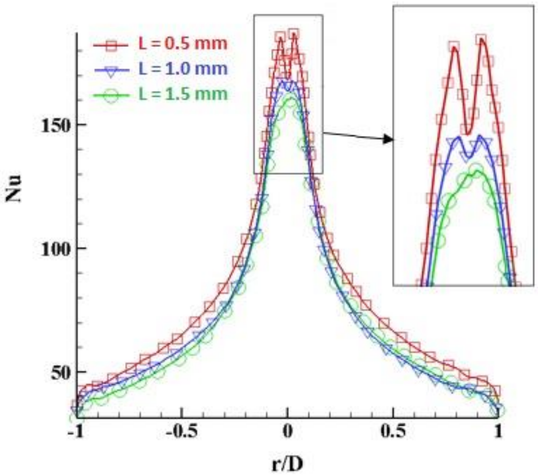
شکل ٦ ضریب فشار برحسب شعاع نیم‌کره به‌ازای سه فاصلهٔ مختلف نازل از سطح آن، در سرعت جت ۲۹۰ متر بر ثانیه و قطر نازل ۱ میلی‌متر



شکل ۷ ضریب اصطکاک برحسب شعاع نیم‌کره به‌ازای سه فاصلهٔ مختلف نازل از سطح آن، در سرعت جت ۲۹۰ متر بر ثانیه و قطر نازل ۱ میلی‌متر

در شکل (۷) تغییرات ضریب اصطکاک پوسته‌ای در امتداد سطح برخورد در فواصل مختلف نازل از سطح رسم شده‌است. این ضریب با فاصله گرفتن از نقطهٔ سکون (محل سرعت صفر)، در فاصلهٔ کوتاهی به سرعت از یک مقدار نزدیک به صفر تا بیشینه مقدار خود افزایش می‌یابد و سپس مجدداً با شیب تندی در جهت شعاع کاهش می‌یابد. لذا مقدار بیشینهٔ ضریب اصطکاک در برخورد جت با سطح نیم‌کره، در شعاع کوچکی در اطراف نقطهٔ سکون اتفاق می‌افتد. هم‌چنین شکل (۷) نشان می‌دهد که با نزدیک شدن جت به صفحهٔ برخورد، ضریب اصطکاک نیز به‌طور صعودی در حال افزایش است، زیرا تنش برشی وارد بر سطح با کاهش فاصلهٔ نازل، به‌طور کلی روندی افزایشی دارد.

تغییرات عدد ناسلت در امتداد سطح نیم‌کره به‌ازای فواصل مختلف نازل از سطح در شکل (۸) نشان داده شده‌است. این شکل ثابت می‌کند که ضریب انتقال حرارت محلی نیز روند تغییراتی همانند ضریب اصطکاک در امتداد شعاع دارد. به این معنی که در فاصلهٔ شعاعی کوچکی از محل برخورد، مقدار بیشینهٔ خود روی سطح نیم‌کره را تجربه می‌کند. پس از آن، این ضریب با شیب تندی در امتداد سطح نیم‌کره کاهش خواهد یافت. تغییر فاصلهٔ نازل از سطح بر ضریب انتقال حرارت در این شکل نیز نشان می‌دهد که با کاهش فاصلهٔ نازل از سطح، به‌دلیل سرعت بیشتر برخورد جت با سطح، ضریب انتقال حرارت بیشتر می‌شود و تبادل حرارت سطح با جت بهتر انجام می‌گیرد. این موضوع مزیت بارز سوراخ‌کاری با جت آب را نسبت‌به سایر روش‌ها نشان می‌دهد که با وجود کاهش فاصلهٔ نازل با سطح برای بهره بردن از فشار بیشتر در سوراخ‌کاری، تبادل حرارت نیز بهتر انجام می‌شود که این خود مانع از افزایش بیش از حد دمای سطح استخوان و آسیب دیدن آن می‌گردد.

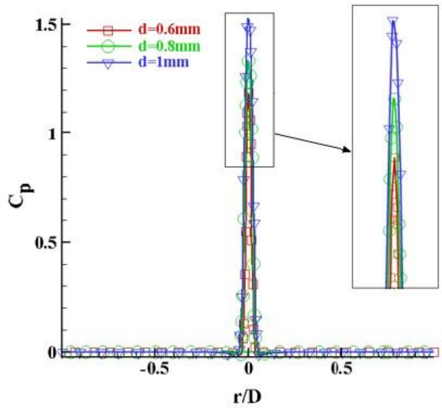


شکل ۸ ضریب انتقال حرارت برحسب شعاع نیم‌کره به‌ازای سه فاصلهٔ مختلف نازل از سطح آن، در سرعت جت ۲۹۰ متر بر ثانیه و قطر نازل ۱ میلی‌متر

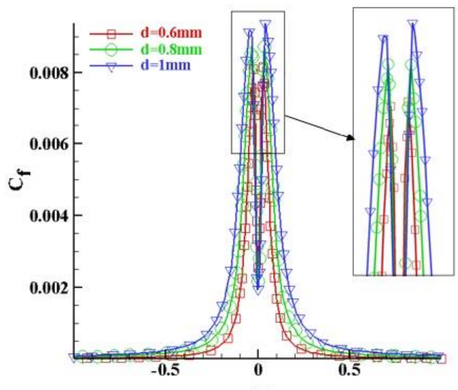
اثر قطر نازل. در این بخش اثر تغییر قطر نازل به‌ازای سه مقدار قطر ۰/۶، ۰/۸ و ۱ میلی‌متر بررسی شده‌است. در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ تأثیرپذیری ضرایب فشار، اصطکاک و انتقال حرارت از تغییر قطر نازل کاملاً مشهود است. افزایش قطر نازل در سرعت‌های یکسان، به‌معنای افزایش دبی جرمی جریان جت برخوردی به سطح و هم‌چنین پوشش سطح بیشتری از سطح در برخورد جت به سطح است. در شکل (۹) مشاهده می‌شود که مقدار ضریب فشار در نقطهٔ سکون با افزایش قطر نازل تقریباً به‌طور خطی افزایش می‌یابد. با این حال در سایر نقاط سطح نیم‌کره، این ضریب تأثیرپذیری

زیادی از قطر نازل نخواهد داشت.

شکل (۱۰) نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک روی سطح نیم‌کره نیز در همهٔ نقاط با افزایش قطر نازل جت افزایش یافته‌است. میزان افزایش ضریب اصطکاک تقریباً برای همهٔ نقاط روی سطح به یک میزان با قطر نازل تغییر می‌کند. توجه ویژه به محدودهٔ محل برخورد که سوراخ‌کاری انجام می‌شود ثابت می‌کند که با تغییر قطر نازل در سرعت ثابت و در نتیجه تغییر در دبی جرمی جت آب خروجی، ضریب اصطکاک سطحی به یک اندازه تغییر را تجربه می‌کند؛ یعنی ارتباط آن با قطر نازل تقریباً خطی است.

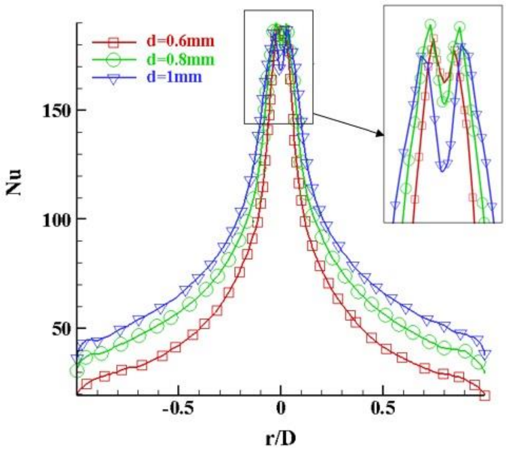


شکل ۹ ضریب فشار برحسب شعاع نیم‌کره به‌ازای سه قطر مختلف نازل، در سرعت جت ۲۹۰ متر بر ثانیه و فاصلهٔ نازل ۰/۵ میلی‌متر از سطح



شکل ۱۰ ضریب اصطکاک برحسب شعاع نیم‌کره به‌ازای سه قطر مختلف نازل، در سرعت جت ۲۹۰ متر بر ثانیه و فاصلهٔ نازل ۰/۵ میلی‌متر از سطح

توزیع عدد ناسلت محلی روی سطح نیم‌کره نیز به‌ازای قطرهای مختلف نازل در شکل (۱۱) نشان داده شده‌است. می‌توان گفت که با افزایش قطر نازل، به‌طور کلی انتقال حرارت افزایش یافته‌است.

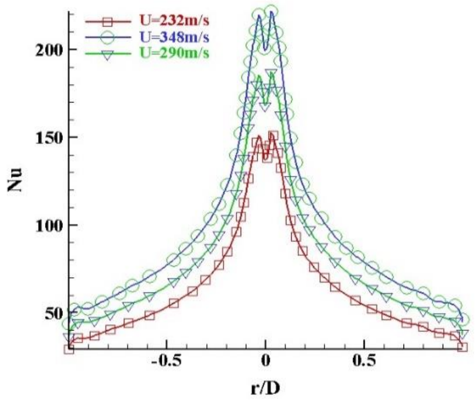


شکل ۱۱ ضریب انتقال حرارت برحسب شعاع نیم‌کره به‌ازای سه قطر مختلف نازل، در سرعت جت ۲۹۰ متر بر ثانیه و فاصلهٔ نازل ۰/۵ میلی‌متر از سطح

با این حال توجه به محل ماکزیمم عدد نا سلت در مجاورت نقطهٔ سکون نشان می‌دهد که در بین سه قطر نازل مطالعه شده، بیشترین مقدار عدد ناسلت مربوط به قطر نازل میانی، یعنی قطر ۰/۸ میلی‌متر بوده‌است. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش قطر نازل همواره سبب افزایش ماکزیمم انتقال حرارت در محل برخورد جت به سطح نمی شود و مقدار بهینه‌ای برای قطر نازل برای بیشینه تبادل حرارت در این ناحیه وجود دارد که در این حالت، قطر ۰/۸ میلی‌متر این ویژگی را داراست.

اثر سرعت جریان جت. در مطالعهٔ اثر سرعت جت بر جریان و انتقال حرارت جت برخوردی به سطح، سه سرعت ۲۳۲، ۲۹۰ و ۳۴۸ متر بر ثانیه بررسی شده‌است. در این حالت، فاصلهٔ نازل از سطح مقدار ثابت ۰/۵ میلی‌متر و قطر نازل، مقدار ثابت ۱ میلی‌متر در نظر گرفته‌شده‌است. در این حالت مشخص شد که بازهٔ تغییرات حدوداً ۵۰ درصدی سرعت جت، تأثیر چندانی

بر ضرایب فشار و اصطکاک نگذاشته‌است و لذا از رسم نمودار آنها صرف‌نظر شد. با این حال، تأثیر سرعت بر عدد ناسلت قابل توجه است و نتیجه در شکل (۱۲) نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که افزایش سرعت جت، به‌طور کلی سبب افزایش انتقال حرارت محلی روی سطح نیم‌کره شده‌است. هم‌چنین درمورد افزایش سرعت نیز مشاهده می‌شود که عدد ناسلت با سرعت جت رابطه‌ای مستقیم و تقریباً خطی دارد.



شکل ۱۲ ضریب انتقال حرارت برحسب شعاع نیم‌کره به‌ازای سه سرعت مختلف جت، در قطر نازل ۱ میلی‌متر و فاصلهٔ نازل ۰/۵ میلی‌متر از سطح

فرآیند سوراخ کاری. در شبیه‌سازی فرایند سوراخ‌کاری سطح، به‌منظور کاهش حجم محاسبات و شبکه‌بندی، تنها بخشی از نیم‌کره که در مجاورت محل سوراخ‌کاری قرار می‌گیرد و طبق نتایج ارائه‌شده در بالا، بیشتر تحت تأثیر برخورد جت به سطح قرار می‌گیرد، به‌عنوان حوزهٔ محاسباتی در نرم‌افزار آباکوس المان‌بندی شده‌است. هم‌چنین خصوصیات فیزیکی مواد برای ورود به نرم‌افزار، براساس مرجع [16] در جدول (۱) ارائه شده‌است.

جدول ۱ ضرایب فاز پلاستیک در معیار جانسون کوک برای مدل استخوان مورد نظر [16]

A (MPa)	B (MPa)	n	M
۵۰	۱۰۱	۰/۰۸	۰

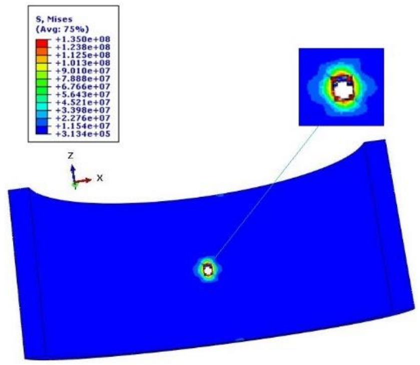
مهم‌ترین بخش در شبیه‌سازی فرایند سوراخ‌کاری، یافتن ضرایب شکست مناسب برای مدل استخوان مورد نظر است، به‌طوری که براساس معیارهای تنش انتخاب شده، شکست المان‌های سطح تحت اثر نیروی وارد از طرف جت آب اتفاق بیفتد. این کار با تکرارهای متعدد حل عددی امکان‌پذیر می‌شود. ضرایب شکست به‌دست‌آمده طی این فرایند براساس معیار جانسون-کوک در جدول (۲) ارائه شده‌است.

جدول ۲ ضرایب شکست انتخاب‌شده در معادلات جانسون-کوک برای مدل استخوان مورد نظر

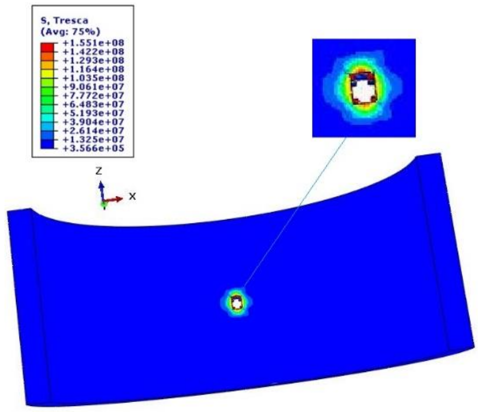
d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
−۰/۷۷	۱/٤٥	−۰/۷۷	۰	۰

در شکل‌های (۱۳) کانتورهای به‌دست‌آمده برای تنش حاصل از شبیه‌سازی فرایند سوراخ‌کاری استخوان با جت آب به‌ترتیب براساس معیارهای فون مایزز و ترسکا ارائه شده‌است. نتیجهٔ این شبیه‌سازی نشان داد که ماکزیمم تنش اعمالی معیار فون مایزز و ترسکا برای استخوان به‌ترتیب ۱۳۵ و ۱۵۵ مگاپاسکال است. البته به‌علت محافظه‌کارتر بودن معیار ترسکا، مقدار عددی تنش این معیار بیشتر از معیار فون مایزز می‌باشد، ولی عدد به‌دست‌آمده در معیار فون مایزز دقیق‌تر است. مشاهدهٔ کانتورهای تنشی ارائه‌شده در شکل (۱۳) درک بهتری از نواحی با تمرکز تنش و هم‌چنین نحوهٔ توزیع آن در محل سوراخ‌کاری براساس این دو معیار می‌دهند.

ازآنجایی‌که براساس ویژگی‌هایی که برای استخوان تعریف شد، ماکزیمم تنش‌های ایجادشده بر اثر برخورد جت آب به سطح استخوان بیش از حد تحمل تنش استخوان است، شکست المان‌های سطح و درنتیجه سوراخ‌کاری اتفاق خواهد افتاد.



الف

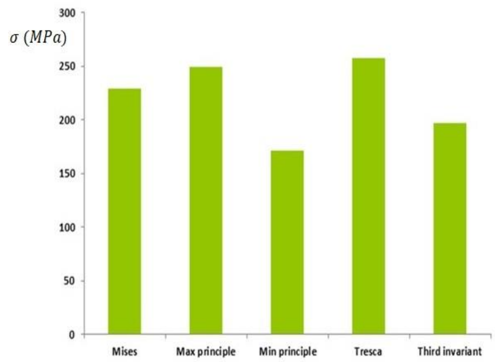


ب

شکل ۱۳ کانتور تنش ایجادشده طی فرآیند سوراخ‌کاری سطح براساس معیار (الف) فون مایزز و (ب) ترسکا

کانتورها همچنین حکایت از عدم وجود نواحی با تمرکز تنش بســیار بالا در اطراف محل برخورد طی فرایند سـوراخ‌کاری با جت آب دارند که این موضـوع، مزیت این روش را نسبت‌به سوراخ‌کاری با مته نشان می‌دهد.

در نمودار میله‌ای ۱٤، ماکزیمم تنش اعمالی برای سوراخ‌کاری استخوان با معیارهای مختلف تنشی با هم مقایسه شده‌اند. معیارهای فون مایزز، ترسکا و مقادیر تنش‌های اصلی ماکزیمم و مینیمم در این نمودار رسم شده‌اند. در این شکل همچنین ناوردای سوم (Third invariant) که معرف تنش‌های انحرافی است و در بررسی آسیب یا شکست المان‌ها در فرآیند سوراخ‌کاری اهمیت دارد نیز دیده می‌شود. محاسبهٔ تنش‌های اصلی به‌ویژه برای مواد تُرد اهمیت دارد که مقدار آنها با تنش تسلیم ماده مقایسه می‌شود، درحالی‌که معیارهای فون مایزز و ترسکا مبتنی‌بر محاسبهٔ تنش برشی هستند و برای مواد منعطف کارایی بهتری دارند. با این حال، معیار فون مایزز نتایج دقیق‌تری نسبت‌به معیار ترسکا ارائه می‌دهد. محتاط‌تر بودن معیار ترسکا در فرایند سوراخ‌کاری سطح استخوان نسبت‌به معیار فون‌مایزز و در عین حال نزدیک بودن نتایج آن به مقدار تنش اصلی در این نمودار به‌خوبی قابل مشاهده است.



شکل ١٤ مقایسهٔ مقادیر ماکزیمم تنش براساس معیارهای مختلف در فرایند سوراخ‌کاری استخوان با جت آب

نتیجه‌گیری

در این مطالعه مسئلهٔ سوراخ‌کاری استخوان با جت آب به‌صورت عددی شبیه‌سازی شده‌است. برای مدل‌سازی سه‌بعدی جریان جت مغشوش برخوردی به سطح نیم‌کره، از روش حجم محدود به‌همراه مدل آشفتهٔ انتقال تنش رینولدز و برای شبیه‌سازی فرایند سوراخ‌کاری، از روش المان محدود و حل معادلات جانسون- کوک استفاده شد. برای صحت‌سنجی بخش جریان جت نیز مقایسه‌ای با مطالعهٔ عددی دوبعدی و داده‌های تجربی موجود در مطالعات گذشته صورت پذیرفت.

مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه را می‌توان به‌صورت زیر جمع‌بندی کرد:

- ضریب فشار با کمتر شدن فاصلهٔ نازل از سطح در محدودهٔ نقطهٔ سکون افزایش می‌یابد. در ناحیهٔ نزدیک صفحهٔ برخورد، سرعت محوری به‌سرعت کاهش و فشار استاتیک به شدت افزایش می‌یابد. هم‌چنین عدد نوسلت محلی نیز درجهت افزایش شعاع از حداکثر مقدار خود در محدودهٔ نقطهٔ سکون کمتر می شود و با افزایش فاصلهٔ نازل از سطح برخورد، مقدار ماکزیمم آن در نقطهٔ سکون نیز کاهش می‌یابد.

- ضریب فشار با افزایش قطر نازل در نقطهٔ سکون افزایش می‌یابد. مقدار بیشینهٔ ضریب اصطکاک نیز در همهٔ فواصل نازل تا سطح، به‌ازای قطر نازل بزرگ‌تر بیشتر است. درراستای شعاعی هم همیشه نازل با قطر بزرگ‌تر، فشار بیشتری بر سطح اعمال می‌کند.

تغییرات سرعت جت تا میزان ۵۰ درصد، تأثیر چندانی بر ضرایب فشار و اصطکاک نخواهد گذاشت، ولی هرچه سرعت افزایش یابد، ضریب انتقال حرارت نیز با نسبت یکسانی افزوده خواهد شد.

- مدل سازی سوراخ‌کاری سطح استخوان با جت آب نشان داد که ضرایب انتخاب‌شده برای شکست المان‌های استخوان در معیار جانسون- کوک به‌خوبی فرایند سوراخ‌کاری را شبیه‌سازی می‌کنند. ماکزیمم تنش اعمالی معیار فون مایزز و ترسکا برای استخوان، به‌ترتیب ۱۳۵ و ۱۵۵ مگاپاسکال به‌دست آمد که معیار ترسکا محافظه‌کارانه‌تر و معیار فون مایزز دقیق‌تر است. باتوجه به این‌که ماکزیمم تنش‌های ایجادشده بر اثر برخورد جت آب به سطح استخوان بیش از حد تحمل تنش استخوان است، سوراخ‌کاری به‌درستی و باتوجه به توزیع تنش، به‌طور یکنواختی انجام می‌پذیرد.

واژه نامه

سوراخ‌کاری استخوان	Bone Perforation
شبیه‌سازی عددی	Numerical Simulation
جت برخوردی	Impinging jet
جریان دوفازی	Two-phase flow
روش حجم محدود	Finite-volume method
روش اجزای محدود	Finite-element method
تراشه برداری	Chipping
نقطه سکون	Stagnation point
روش حجم سیال	Volume of fluid method
مدل تنش رینولدز	Reynolds Stress Model

مراجع

1. Tu, Y.K., Chen, L.W., Huang, C.C., Chen, Y.C., Tsai, H.H. and Lin, L.C., "Finite Element Simulation of Drill Bit and Bone Thermal Contact During Drilling", *Proceedings of the 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, IEEE.*, pp. 1268-1271, (2008).
2. Shakouri, E. and Maerefat, M., "Theoretical and Experimental Investigation of Heat Generation in Bone Drilling: Determination of the Share of Heat Input to the Bone Using Machining Theory and Inverse Conduction Heat Transfer", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No.7, Pp. 131-140, (2017).
3. Shakouri, E., Haghighi Hassanali, H. and Gholampour, S., "Experimental Evaluating and Statistical Modeling of Temperature Elevation in Bone Drilling with Internal Cooling with Gas", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No.3, Pp. 47-54, (2017).

4. Liu, X., Liu, S. and Ji, H., "Numerical Research on Rock Breaking Performance of Water Jet Based on SPH", *Powder Technology*, Vol. 286, pp. 181-192, (2015).
5. Li, M., Ni, H., Wang, G. and Wang, R., "Simulation of Thermal Stress Effects in Submerged Continuous Water Jets on the Optimal Standoff Distance During Rock Breaking", *Powder Technology*, Vol. 320, pp. 445-456, (2017).
6. Haghighi, H.H. and Gholampour, S., "Finding the Optimal Drill Bit Material and Proper Drilling Condition for Utilization in the Programming of Robot-Assisted Drilling of Bone", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 31, pp. 34-47, (2020).
7. Di Venuta, I., Petracci, I., Angelino, M., Boghi, A. and Gori, F., "Numerical Simulation of Mass Transfer and Fluid Flow Evolution of a Rectangular Free Jet of Air", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 117, pp. 235-251, (2018).
8. Kuraan, A.M., Moldovan, S.I. and Choo, K., "Heat Transfer and Hydrodynamics of Free Water Jet Impingement at Low Nozzle-to-Plate Spacings", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 108, pp. 2211-2216, (2017).
9. Baghel, K., Sridharan, A. and Murallidharan, J.S., "Heat Transfer Characteristics of Free Surface Water Jet Impingement on a Curved Surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 164, 120487, (2021).
10. Hirt, C.W. and Nichols B.D., "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, No. 1, pp. 201-225, (1981).
11. Hanjalic, K. and Launder, B., "A Reynolds Stress Model of Turbulence and its Application to Thin Shear Flows", *Fluid Mechanics*., Vol. 52, pp. 609-638, (1972).
12. Lotfi, M., Amini, S. and Aghaei, M., "3D FEM Simulation of Tool Wear in Ultrasonic Assisted Rotary Turning", *Ultrasonics*, Vol. 88, pp.106-114, (2018).
13. Cakir, F.H., Gurgen, S., Sofuoglu, M.A., Celik, O.N. and Kushan, M.C., "Finite Element Modeling of Ultrasonic Assisted Turning of Ti6Al4V Alloy", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 195, pp. 2839-2848, (2015).
14. Murugesan, M. and Jung, D.W., "Johnson Cook Material and Failure Model Parameters Estimation of AISI-1045 Medium Carbon Steel for Metal Forming Applications", *Materials*, Vol. 12, No. 4, pp. 609, (2019).
15. Hu, G., Zhang, L., "Experimental and Numerical Study on Heat Transfer with Impinging Circular Jet on a Convex Hemispherical Surface", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 28, No. 12, pp. 1008-1016, (2007).
16. Santiuste, C., Rodríguez-Millán, M., Giner, E. and Miguélez, H., "The Influence of Anisotropy in Numerical Modeling of Orthogonal Cutting of Cortical Bone", *Composite Structures*, Vol. 116, pp. 423-431, (2014).

Numerical Simulation of Cranial Bone Perforation Process Using Water Jet

Shahed Al-Sadat Alavi[1], Masoud Ziaei-Rad[2], Nima Jamshidi [3]

1. Introduction

Waterjet is a general term for the equipment that uses a high pressure water flow for cutting and cleaning purposes. One of the most important advantages of cutting with waterjet is that this process is inherently cold cutting and does not generate heat. Having this feature, the waterjet can easily perforate all kinds of materials include human body's bones, while in other cutting methods there is a possibility of burning, melting or cracking of the material. During the cutting with a waterjet, it is possible to adjust the forward speed on the material.

A review of the previous studies shows that most of the studies have focused on bone perforation by a drill or drilling a metal with a water jet. Therefore, numerical simulation of impinging jet flow on a bone as well as the perforation process cannot be found in the literature. In this study, in addition to the numerical simulation of turbulent flow of an impinging jet on a bone surface using finite volume method, finite element approach along with stress criteria are also applied to model the perforation process. Moreover, the effect of different parameters such as nozzle distance from the surface, nozzle diameter, and the flow velocity are investigated.

2. Physical Model and Assumptions

Figure 1 shows a schematic of the problem geometry and impinging jet flow on the surface. Three-dimensional geometry of a hemisphere with a diameter of *D* is considered as a simple model for the human skull. The waterjet strikes the surface radially at a constant velocity *V* from a circular cross-section nozzle with diameter *d*, located at a distance *L* from the highest point of the hemisphere, and then flows circumferentially on the surface. The surface temperature is assumed to be constant. Moreover, the flow of the jet is considered steady and incompressible. Based on the free jet velocity and nozzle diameter, the Reynolds number will be in the range of turbulent flow regime. The ambient air is static and in standard condition. The effects of gravity can be neglected due to high velocity and dominant force-convection flow of the jet.

Moreover, the surface perforation process is assumed to be steady. This means that chipping process is neglected and only the effect of waterjet force on the surface in breaking the solid elements will be considered.

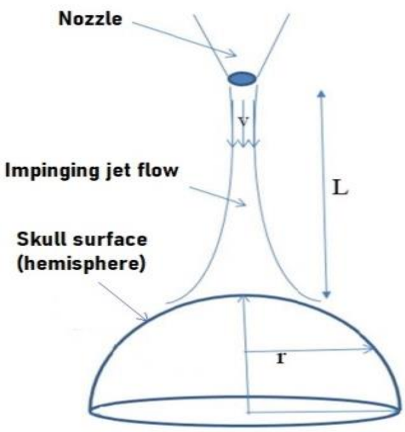


Figure 1. Schematic of impinging water jet on cranial bone surface

3. Mathematical Modeling and Numerical Procedure

In this research, numerical solution of the governing continuity, momentum and energy equations for the jet flow are performed using Ansys software. Also, the governing Johnson-cook equations for surface drilling process are solved by Abaqus software. The governing equations and boundary conditions of the fluid flow are solved based on finite volume method, and SIMPLE algorithm is applied for the velocity-pressure field coupling. Moreover, PRESTO interpolation is used to discretize the pressure gradient term. This method is recommended for the flow fields with high streamline curvature. Also, the convection terms in momentum and energy equations are discretized using QUICK scheme, which provides a good accuracy for complex flows on unstructured grid. The preferred turbulence model for this problem is Reynolds Stress Model (RSM). Based on previous

[1]. MSc. Student, Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

[2]. Corresponding author. Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran. Email: m.ziaeirad@eng.ui.ac.ir

[3]. Assistant Professor, Biomedical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

studies, this model gives a more accurate estimation of fluctuating components in non-isotropic turbulent flows with high-curvature computational domain.

4. Results and Discussion

4.1. Impinging jet flow

Figure 2 shows the variation of Nusselt number along the hemisphere surface at different nozzle distance from the surface. This figure clarifies that local heat transfer coefficient has the same trend of variation with the friction coefficient. This means that it reaches its maximum value on the hemisphere surface at a small radial distance from the stagnation point. Then, this coefficient decreases with a steep slope along the surface. The effect of changing in nozzle distance from the surface on heat transfer coefficient also indicates that by reducing the distance, due to increase in jet velocity impinging the surface, the heat transfer coefficient increases and therefore, heat exchange between the jet and the surface is improved. This shows the obvious advantage of waterjet drilling compared to other methods, where by reducing the distance between the nozzle and the surface to gain more pressure in drilling process, the heat transfer is also improved and prevents the bone temperature enhancement and resulting damage.

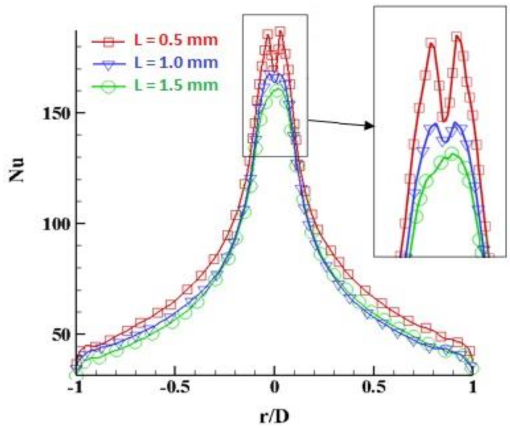


Figure 2. Radial change of heat transfer coefficient at different nozzle distance from the surface, for jet speed of 290 m/s and nozzle diameter of 1mm

The variation of local Nusselt number on the hemisphere surface at different nozzle diameters is also plotted in Figure 3. It can be seen that by increasing the nozzle diameter, the heat transfer rate is increased. However, considering the location of maximum Nusselt number in the vicinity of stagnation point, we can see that among the three studied nozzle diameters, the highest Nusselt number belongs to the middle one, that is, 0.8mm. This proves that increasing the nozzle diameter does not always increase the maximum heat transfer from the surface. Hence, there is an optimal value for the nozzle diameter for maximum heat transfer rate, which here is 0.8mm diameter nozzle.

4.2. Perforation process

During the simulation, in order to reduce the computational costs, only a part of the hemisphere adjacent to drilling region, which affected by the jet flow is considered as the computing domain in Abaqus. The physical properties of the cranial bone to be inserted in the software are presented in Table 1.

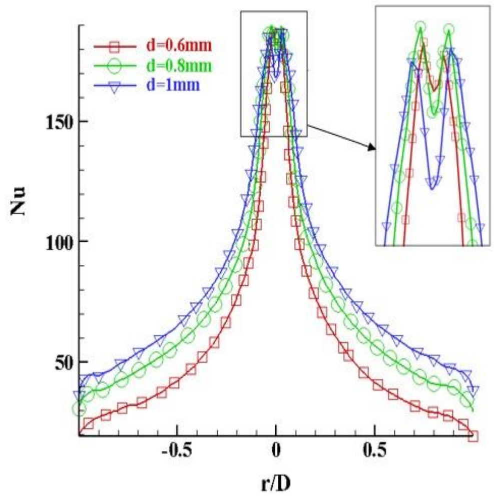


Fig. 3. Radial change of heat transfer coefficient at different nozzle diameters, for a jet speed of 290 m/s and a nozzle distance of 0.5mm

Table 1. Plastic phase coefficients in Johnson Cook's criterion for the bone model

A (MPa)	B (MPa)	n	M
50	101	0.08	0

The most important part in simulating drilling process is to find the appropriate failure indices for the bone, so that according to the selected stress criteria, the failure of surface elements occurs due to the force applied by the waterjet. This is possible during an iterative numerical procedure. Table 2 summarizes the failure coefficients obtained finally in this process based on Johnson-Cook's criterion.

Table 2. Selected failure coefficients in Johnson Cook's equations for the bone model

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
0.77	1.45	0.77	0	0

Figure 4 shows the contours of stress obtained from the simulation of waterjet drilling process based on Mises criterion. The results show that maximum applied stresses of Mises and Tresca criteria for the bone are 135 and 155 MPa,

respectively. Actually, since the Tresca criterion is more conservative, the stress value of this criterion is higher than Mises criterion, while the obtained value for Mises criterion is more accurate. The stress contours presented in Figure 4 gives a good understanding of higher-stress regions as well as the stress distribution in drilling area on the bone surface.

Based on the properties defined for the bone, the maximum stresses created by the waterjet on the surface are much higher than the yield stress of the bone. Thus, the failure of surface elements will occur as a result of drilling process.

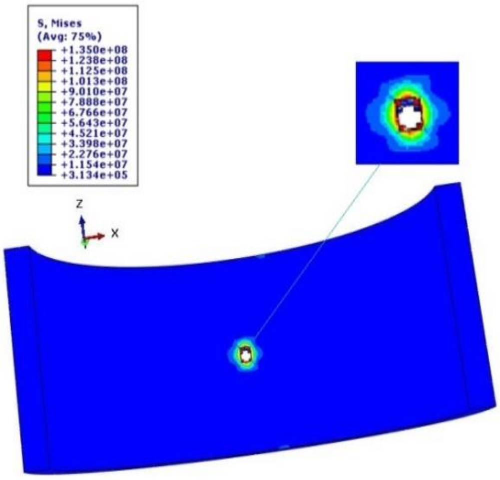


Figure 4. Stress contour during bone surface drilling process according to Mises criterion

5. Conclusion

The most important results obtained in this study can be summarized as follows:

1. The local Nusselt number decreases in radial direction from its maximum value in the vicinity of stagnation point. By increasing the nozzle distance from the surface, its maximum value decreases at the stagnation point;
2. As the waterjet velocity increases, the heat transfer coefficient is also increased by the same ratio;
3. The selected coefficients for the failure of surface elements in Johnson-Cook's criterion can properly simulate the drilling process. Due to the fact that the maximum stress applied to the surface by the waterjet is higher than the bone's yield stress, drilling process is performed uniformly according to the stress distribution.